干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

博斯腾湖小湖区湿地生态需水量阈值研究

刘 英[1,2,3]， 钟瑞森[1,2,3]， 段永超[1,2,3,4]， 程 勇[5]， 姜立新[6]，
李江宏[6]， 刘 铁[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆维吾尔自治区遥感与地理信息系统应用重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 南京信息工程大学滨江学院，江苏 无锡 214105；5. 新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局，新疆 库尔勒 841000；6. 新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局博斯腾湖管理处，新疆 库尔勒 841000）

摘 要：湿地生态需水量阈值是其生态系统发生质变的临界条件，一旦某阈值被超越，系统的某些物质平衡关系、功能、健康就会受到影响，而月尺度的湿地生态需水量阈值研究有助于水资源优化配置。针对博斯腾湖小湖区芦苇沼泽镶嵌交错明水塘道的景观结构，结合遥感数据同步获取大范围数据的优势，利用长时间序列的水面面积频率分析，确定月尺度最小、中等和理想状态的小湖区湿地明水区面积；采用蒸发皿观测值计算法，核算小湖区湿地的月尺度最小、中等和理想生态耗水量。结果表明：小湖区湿地全年月平均最小、中等和理想的生态水面面积为14.47 km^2、21.56 km^2、26.75 km^2；小湖区湿地生长季3—9月最小生态需水量为0.22×10^8 m^3、0.35×10^8 m^3、0.44×10^8 m^3、0.51×10^8 m^3、0.39×10^8 m^3、0.41×10^8 m^3、0.28×10^8 m^3，其中6月最大，3月最小，小湖区湿地年最小生态需水量约为3.02×10^8 m^3；如若同时满足小湖区湿地生态目标芦苇生长所需动态水位，3—9月最小生态需水量为0.40×10^8 m^3、0.52×10^8 m^3、0.79×10^8 m^3、0.86×10^8 m^3、2.31×10^8 m^3、0.41×10^8 m^3、0.28×10^8 m^3，其中7月最大，9月最小，小湖区湿地年最小生态需水量约为5.99×10^8 m^3。本研究计算结果可用于小湖区湿地年、月尺度来水分配及出水调控，有利于提高区域水资源利用效率，确保小湖生态可持续发展。

关 键 词：生态需水量；阈值；频率分析；博斯腾湖小湖区湿地
文章编号：

湿地是重要的自然生态系统，在净化水质、调节气候和保护生物多样性等方面具有不可替代的作用[1-4]。生态需水量阈值是一个指示生态需水状态的有效指标[5-9]，一旦某阈值被超越，生态系统的某些物质平衡关系、基本功能、健康就会受到影响。湿地生态需水量的研究涉及水文学、生态学、环境学等交叉学科[10-12]，多以水量平衡为基础，主要采用生态水文分析法、生态学方法和基于遥感的模拟分析法等[13-14]。湿地生态环境需水量分为存量（蓄水量）与通量（耗水量）2个部分[15-16]，存量不需要更新，但合理的存量是保证湿地正常功能的基础，须加以考虑；而通量包括植被蒸散发消耗、水面净蒸发消耗和补给地下水消耗[16-19]，也就是消耗性生态环境需水量[20]。本研究基于这一理念，计算博斯腾湖小湖区湿地生态需水消耗量。目前生态需水、生态耗水等概念尚未有明确的区分[21]。

博斯腾湖小湖区湿地基本上被芦苇等植被覆盖，是博斯腾湖湿地的主要组成部分，对当地经济和生态可持续发展起到关键作用[2,22]。国内学者利用水量平衡法和蒸发皿观测值法[23-24]计算了小湖区的年生态耗水量。对于实际调控所用的生态需水量阈值和月需水量的探讨较少。因为博斯腾湖蒸

收稿日期：2020-10-01； **修订日期**：2021-02-12
基金项目：国家重点研发计划（2017YFC0404501）；王宽诚教育基金会（GJTD-2020-14）和国家自然科学基金项目（42071049）资助
作者简介：刘英（1981-），女，副研究员，博士，主要从事水动力模拟研究. E-mail: lyhello@yeah.net
通讯作者：刘铁（1977-），男，研究员，博士，主要从事流域水文过程模拟研究. E-mail: liutie@ms.xjb.ac.cn

发量的变化与湖水位的变化没有明显的相关关系[25]，且小湖区水面破碎、水道复杂，采用水面面积为水文参数的生态水文法，即生态水面法，兼顾水文状况和生态系统健康状况，确定生态需水量安全阈值，计算适合本研究区的生态需水量。

本研究针对博斯腾湖小湖区芦苇沼泽镶嵌交错明水塘道的景观特点，结合遥感数据的优势，用基于生态水面法的湿地生态环境需水量模型和蒸发皿观测值法进行小湖区生态需水量阈值计算，同时考虑芦苇生长季所需动态水位，按月核算小湖区生态需水，为小湖区生态需水调控提供指导依据，从而更加有效地发挥小湖区的生态和经济作用，更好地服务于博斯腾湖流域水资源优化配置。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

博斯腾湖曾是我国最大的内陆淡水湖，也是新疆干旱内陆区最大的湖泊，位于新疆天山以南焉耆盆地，地理位置41°44′~42°14′N，86°20′~87°26′E，东西长约为55 km，南北宽约为20~25 km。在水位1048.5 m时，湖水水面面积为1210.5 km^2，湖水容积为90×10^8 m^3，平均水深为7.5 m，最深为16 m[26]。博斯腾湖湿地具有控制污染、消除毒物、净化水质、控制土壤侵蚀、维护生物多样性、调节河川径流和地方气候等方面的生态功能[27]。

整个湖区由大、小2个湖区组成(图1)。博斯腾湖大、小湖的河道入流可以通过宝浪苏木分水枢纽(开都河第三分水枢纽)调节，东支入大湖，西支入小湖[28]。大湖区是湖体的主要部分，小湖区位于大湖西南部，处于开都河三角洲、孔雀河河漫滩和博斯腾湖湖滨的交汇地带，由达乌孙诺尔等16个浅湖泊和大片芦苇沼泽湿地组成，地面支沟、河汊、小湖群相串通，洪水期大水漫溢，枯水期地表干涸，地下水位埋深10~60 cm，河湖沿岸积水深20~30 cm[29]，总面积约为350 km^2，是盛产芦苇的湿地，称为小湖苇区[30]。根据芦苇高度、基茎粗及单位面积产量，中国科学院长春地理研究所经过考察对博斯腾湖小湖区芦苇划分为4种类型(表1)[29]。

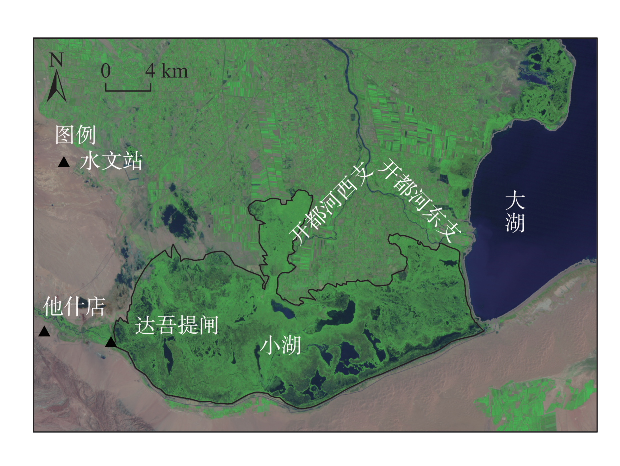


图1 博斯腾湖小湖区遥感影像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of remote sensing images of the small lake wetland of Bosten Lake

博斯腾湖芦苇沼泽区植被在群落组成与分布上，显示与水分相关的分布特征，从湖岸向湖泊中心，水深0~30 cm的区域为芦苇(*Phragmites australis*)群落，水深49~89 cm的区域为香蒲(*Typha orientalis*)群落，水深80~120 cm的区域为浮游植物睡莲(*Nymphaea tetragona*)、荇菜(*Nymphoides peltatum*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)等，水深超过120 cm的区域以次藻为主的沉水植物群落，水深超过200 cm，一般为无植物生长水面[27]。水位高低可以决定区域不同景观类型芦苇面积[31]。

1.2 研究方法

利用基于生态水面法的湿地生态环境需水量模型[16]及蒸发皿观测值法[23]进行小湖区生态需水量阈值计算。

1.2.1 确定小湖区最小、中等和理想生态水面面积

生态水面面积是指生态系统不同健康状况所对应的水面面积[16]。通过分析长时间序列水面面积数据频率，寻求湿地的最小、中等、理想生态水面面积。高频率出现的水面面积，是湿地在长期过程中已经适应的，认为是生态系统较能接受的，高频区间内频率最高的水面面积为理想水面面积；湿地最小生态水面面积，是维持湿地自身存在的水面积，包含在低频率小水面面积中；而中等水面面积在中频范围内。通过求最小、中等、理想生态水面面积与多年平均水面面积的比值，确定生态水面系数，然后将各月多年平均水面面积值乘以生态水面系数，可以得到各月的最小、中等、理想水面面积[16]。

1.2.2 蒸发皿观测值计算法核算小湖区生态耗水

博斯腾湖西南小湖区蒸发蒸腾量(蒸散量)采用蒸发皿观测值计算法进行核算，由不同地表分类面积和实测蒸发强度数据以及相关系数，确定博斯腾湖小湖区生态耗水量[23,25]。博斯腾湖小湖区分类为

表1　博斯腾湖小湖区湿地芦苇分类标准[29]

Tab. 1　Classification criteria for reeds in the small lake wetland of Bosten Lake

类型	芦苇Ⅰ类(高大型)	芦苇Ⅱ类(中间型)	芦苇Ⅲ类(矮小型)	芦苇Ⅳ类(杂草混生型)
地貌部位	河湖边缘	距河湖稍远	距河湖更远的地方	沼泽外缘地带
地表形态	地势低洼	平坦	地势稍高	地势较高
土壤类型	腐殖质沼泽土	泥炭土和盐化泥炭腐殖质沼泽土	泥炭土	盐化泥炭土和盐化草甸沼泽土
积水状况	常年积水	季节积水	常年不积水	地表干燥
积水深度	30~50 cm	20~30 cm	–	–
芦苇高度	350~600 cm	250~350 cm	150~250 cm	<150 cm
基茎粗	>1.2 cm	0.8~1.2 cm	0.5~0.8 cm	<0.5 cm
单产	18.2 t·hm^{-2}	10~18.2 t·hm^{-2}	4~10 t·hm^{-2}	1~4 t·hm^{-2}
盖度	>80%	60%~80%	50%~60%	<50%
伴生植物	极少量苔草	少量苔草	少量拂子茅	多量拂子茅杂草

芦苇Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类，无植被水面，浮水植物，沉水植物和香蒲，其中芦苇Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类归并为沼泽芦苇(芦苇Ⅰ、Ⅱ类)和旱地芦苇(芦苇Ⅲ、Ⅳ类)，浮水植物、沉水植物归为无植物水面(明水区)，香蒲归为沼泽芦苇，故将小湖区分为明水区(包括浮水、沉水植物)、有地表水芦苇区(包括芦苇Ⅰ、Ⅱ类、香蒲)、无地表水芦苇区(包括Ⅲ、Ⅳ类旱地芦苇)[23,32]，通过遥感数据解译以及文献数据收集，获取博斯腾湖小湖区不同类面积，乘以相关系数，分别计算耗水量，最后累加得整个湖泊耗水量，计算公式如下：

$$E = E1 + E2 + E3 \tag{1}$$

$$E1 = E0 \times F1 \times \alpha \tag{2}$$

$$E2 = E0 \times F2 \times \alpha \times K_s \tag{3}$$

$$E3 = F3 \times \gamma \tag{4}$$

式中：E为小湖区总耗水量(mm)；$E1$为小湖区明水区耗水量(mm)；$E2$为有地表水芦苇区耗水量(mm)；$E3$为无地表水芦苇区耗水量(mm)；$F1$、$F2$、$F3$为明水区、有地表水芦苇区、无地表水芦苇区面积(m^2)；$E0$为实测蒸发量，取离小湖较近的塔什店水文站(图1)实测20 cm口径蒸发皿实测蒸发数据，其月最大、最小值分别为409.63 mm、17.86 mm；α为蒸发折算系数，即大水面的蒸发值与20 cm蒸发皿的蒸发值之比，为0.47[23,25]；K_s为植物修正系数，即沼泽型芦苇区的蒸散量与无植物水面蒸发量之比，为1.3[23,25]；γ为旱地芦苇耗水量，因Ⅲ、Ⅳ旱地芦苇与陆地作物耗水量相似，故可参照焉耆盆地单位面积作物实际耗水量值，为750 mm·a^{-1}[23,25]。

1.2.3　小湖区生态需水计算　小湖区由16个小湖和芦苇沼泽湿地组成，地势复杂，16个镶嵌小湖群并有河汊相连，洪水期大水漫溢、旱期地面干涸，因而确定区域水面面积库容曲线较为困难，研究假设小湖区储水量恒定，生态需水计算中未考虑湿地储水量，仅考虑需水通量即小湖区消耗掉的水量，包括水面蒸发、渗漏和植物蒸散量减去降水量，其数学表达式如下：

$$C = E - P \times (F1 + F2 + F3) + K \times I \times (F1 + F2) \times 30 \tag{5}$$

式中：C为月水面耗水量(mm)；P为月降水量(mm)；K为土壤渗透系数(无量纲)；I为渗流坡度(无量纲)。

由于土壤渗透系数和渗流坡度较难获得，以及博斯腾湖小湖区地表为第四纪冲积、湖积物，有颗粒组成较细的亚砂土、亚黏土交替沉积层，透水性差[29]，渗透系数偏小，在3.75~20.00 m·d^{-1}之间[33]，本研究依据小湖区地下水渗漏量值0.22×10^8 m^3[23]以及扎龙湿地取值情况[16]，渗漏损失量($K \times I$)取均值0.18 mm·d^{-1}。

另外，由于芦苇是小湖区主要优势物种，作为生态目标，考虑其生长过程淹水深度需求变化，需要考虑小湖区储水量变化，也是生态需水量的一部分，由小湖区面积乘以淹水深度计算。

1.2.4　博斯腾湖小湖区明水区遥感提取　遥感影像数据从美国地质勘探局(USGS)网站下载(http://glovis.usgs.gov)，选取研究区3—9月质量良好的影像数据(云量≤5%、影像质量9等)。基于遥感影像处理软件ENVI 5.1，利用归一化水体指数(Normal difference water index, NDWI)，进行小湖区明水区提取，其值大于0.35小于1的为水体，小于0.35为非水体[34]。

2 结果与分析

2.1 小湖区生态需水最小、中等、理想水面面积确定

整理分析文献数据[23,29,32,35]及本研究解译的2000—2018年Landsat数据获得1972—2018年博斯腾湖小湖区32 a的年平均水面面积进行频率统计分析，从表2可以看出，高频水面面积出现在35.9~43.1 km²范围内，频数为13，其中有7个在41 km²附近，将其作为理想的标准水面面积；中频水面面积出现在28.7~35.9 km²范围内，频数为6，其中33 km²出现频率最高，将其作为中等标准；而最小水面面积出现在小面积低频率段，小面积区域仅剩下21.5~28.7 km²范围，其中22 km²出现频率最高，将其作为最小生态水面面积。博斯腾湖多年平均水面面积为41.76 km²，进而可以得到最小、中等、理想生态水面系数为0.53、0.79、0.98。

表2 博斯腾湖小湖区湿地水面面积的频数、频率分布

Tab. 2 Distribution of frequency and number of events of the water surface area for the small lake wetland of Bosten Lake

水面面积区间/km²	频次	频率	水面面积区间/km²	频次	频率
21.5~28.7	5	0.16	57.6~64.7	0	0.00
28.8~35.9	6	0.19	64.8~71.9	1	0.03
36.0~43.1	13	0.41	72.0~79.1	1	0.03
43.2~50.3	3	0.09	79.2~86.3	1	0.03
50.4~57.5	1	0.03	86.4~93.5	1	0.03

博斯腾湖小湖区2000—2018年3—9月生长季19 a平均逐月水面面积如表3，由于博斯腾湖冬季结冰降雪，冬季水面面积提取较为困难，其中1、2月水面面积用的是3月面积值，10—12月水面面积用的是9月面积值，利用生态水面系数及各月水面面积确定各月最小、中等、理想水面面积如表3，全年月平均最小生态水面面积为14.47 km²，中等生态水面面积为21.56 km²，理想生态水面面积为26.75 km²（表3）。

2.2 逐月生态需水量计算

由水文年鉴获取塔什店水文站20 cm口径蒸发皿蒸发量月数据、月降雨量，计算为多年月平均值。利用最小、中等、理想水面面积及渗漏损失量、多年月平均蒸发皿观测值、月平均降雨量，再结合大水面蒸发与蒸发皿观测值之间的关系，计算小湖区各月最小、中等、理想水面耗水量（表3），全年最小、中等、理想水面消耗量（含地下水渗漏）为0.16×10⁸ m³、0.24×10⁸ m³、0.30×10⁸ m³；取小湖区多年芦苇面积的平均值319.4 km²[24]，芦苇区最小、中等、理想蒸散量按照多年平均值的0.6、0.8、1.0计算[36]，再结合芦苇耗水与蒸发皿观测值之间的关系，计算维持多年平均芦苇面积各月最小、中等、理想芦苇湿地

表3 博斯腾湖小湖区湿地生态面积及生态需水量阈值

Tab. 3 Ecological area of the small lake wetland of Bosten Lake and the threshold of ecological water demands

月份	平均水面面积/km²	生态水面面积/km²			水面耗水量/10⁸ m³			芦苇湿地耗水量/10⁸ m³		
		最小	中等	理想	最小	中等	理想	最小	中等	理想
1	32.87	17.42	25.97	32.21	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.04
2	32.87	17.42	25.97	32.21	0.00	0.01	0.01	0.06	0.08	0.10
3	**32.87**	**17.42**	**25.97**	**32.21**	**0.01**	**0.02**	**0.03**	**0.21**	**0.27**	**0.34**
4	**33.09**	**17.54**	**26.14**	**32.43**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.33**	**0.44**	**0.54**
5	**30.75**	**16.30**	**24.29**	**30.13**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.41**	**0.56**	**0.70**
6	**26.24**	**13.91**	**20.73**	**25.72**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.48**	**0.64**	**0.81**
7	**24.82**	**13.16**	**19.61**	**24.32**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.37**	**0.51**	**0.64**
8	**25.81**	**13.68**	**20.39**	**25.30**	**0.02**	**0.03**	**0.04**	**0.38**	**0.52**	**0.65**
9	**22.06**	**11.69**	**17.42**	**21.61**	**0.01**	**0.02**	**0.02**	**0.27**	**0.36**	**0.46**
10	22.06	11.69	17.42	21.61	0.01	0.01	0.02	0.19	0.26	0.32
11	22.06	11.69	17.42	21.61	0.00	0.01	0.01	0.09	0.12	0.14
12	22.06	11.69	17.42	21.61	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.04
平均	27.30	14.47	21.56	26.75	–	–	–	–	–	–
总和	–	–	–	–	0.16	0.24	0.30	2.85	3.83	4.80

注：黑体表示生长季数据。

耗水量(表3)，全年最小、中等、理想芦苇湿地耗水量(含地下水渗漏)为2.85×10^8 m^3、3.83×10^8 m^3、4.80×10^8 m^3；水面耗水和芦苇耗水之和(含地下水渗漏量)为小湖区全年生态需水通量，小湖区生长季3—9月最小、中等和理想生态需水通量为0.22×10^8~0.51×10^8 m^3，0.29×10^8~0.68×10^8 m^3，0.37×10^8~0.86×10^8 m^3(图2)。假设小湖区存量不变，博斯腾湖小湖区年最小、中等、理想生态需水量为3.02×10^8 m^3、4.07×10^8 m^3、5.10×10^8 m^3(表3)。

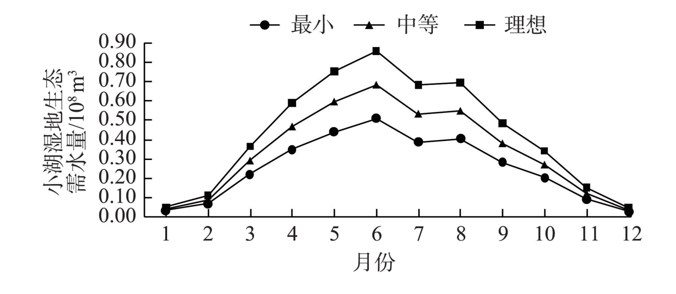


图2　博斯腾湖小湖区湿地逐月生态需水量

Fig. 2　Monthly ecological water demands of the small lake wetland of Bosten Lake

2.3　考虑动态水位的小湖区逐月需水量

根据已有研究结果[27,37]，以及博斯腾湖小湖区芦苇生长发育情况，确定博斯腾湖小湖区芦苇淹水曲线(图3)，小湖区按月淹水深度情况如下：1、2月小湖区不需要积水，3月对田地进行补水化冻维持5 cm水深，4月补水利于芦苇发芽生长维持10 cm水深，5月芦苇已长高为促进其更好生长维持水深20 cm，6月同理维持水深30 cm(芦苇最佳水深，优化芦苇密度和株高)；7、8、9月芦苇已超过1 m高，为了促进生长，维持水深55 cm(利于芦苇长高)，期间为了控制病虫害有一次烤田，排出田里的水，烤田后并补充水深到55 cm，耗水较多；9月底至10月初烤田，

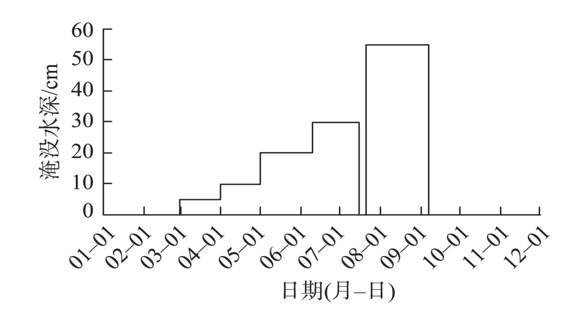


图3　博斯腾湖小湖区湿地芦苇区水深月变化

Fig. 3　Monthly change of water depth in the reed area of the small lake wetland of Bosten Lake

排水减少病虫害，11、12月不需要积水。

不考虑小湖群地形变化情况，假设小湖区是一个柱体，水深增加，水面面积不变。依据小湖区芦苇区月水深变化数据，以及小湖区面积350 km^2，进行维持月动态水位需水核算，由淹水深度乘以面积计算储水量。维持水深需要的水量不消耗，即存量不需要更新，可持续累加，比如3月为维持0.05 m水深需水0.175×10^8 m^3，4月为维持0.10 m水深，需再补0.05 m水深水量0.175×10^8 m^3，而不是总数0.35×10^8 m^3，因此维持不同水深需要的月水量如图4，维持小湖区动态水深年需水量为2.98×10^8 m^3，在芦苇生长期烤田需水较多，对应图中7月需水量最高值。为了满足小湖区芦苇自身生长耗水及动态水位需求，小湖区年总需水量为3.02×10^8~8.07×10^8 m^3，小湖区年最小需水量为3.02×10^8 m^3。小湖区生长季月需水量较高，同时满足动态水位需求的小湖区湿地生长季3—9月生态需水量分别为0.40×10^8~0.54×10^8 m^3，0.52×10^8~0.76×10^8 m^3，0.79×10^8~1.10×10^8 m^3，0.86×10^8~1.21×10^8 m^3，2.31×10^8~2.60×10^8 m^3，0.41×10^8~0.69×10^8 m^3，0.28×10^8~0.48×10^8 m^3。

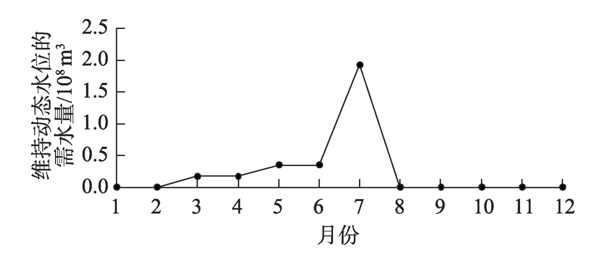


图4　维持动态水深的月需水量

Fig. 4　Monthly water demands for maintaining dynamic water depth

3　讨 论

为了更好的体现生态需水的年内变化情况，更好的满足湿地生态需水量，本研究按月进行生态需水计算，明确各月需水量，便于水资源优化配置，使结果更具实用性和指导意义，使水资源利用更高效。不考虑满足芦苇动态水深需求，博斯腾湖小湖区年最小、中等、理想生态需水量为3.02×10^8 m^3、4.07×10^8 m^3、5.10×10^8 m^3，在利用水量平衡法计算的1990—2008年生态耗水量3.03×10^8~5.13×10^8 m^3[24]范围内，与李继冰研究及其文中提到多项研究的结果较为一致，在2.68×10^8~4.96×10^8 m^{3}范围内[23]，说

明本文计算结果较为合理，月生态需水量较为可信。对小湖区的需水配置可以依据计算的逐月最小、中等、理想生态需水量进行，可有针对性的配水，提高水资源利用效率。

本研究考虑了小湖区生态目标芦苇生长需要的动态水深需求，在核算生态需水时包含了满足动态水位的水量。本文动态水深是基于以下研究内容确定：虽然芦苇属于广布植物，但芦苇仍然是喜湿性植物，一般生长在浅水水域，有适宜的水深范围，水深过低和过高都是芦苇生长的制约因子[32,38-39]。芦苇可生活在-0.6~1.0 m的水深范围内；水深在0.0~0.4 m范围内，优势植物主要是芦苇；芦苇的幼苗适合在较浅的淹水中生长，随着幼苗的成长，芦苇的耐水性将提高，随着水深的增加植被覆盖度也随之增加；在平均水深为0.3 m时，达到芦苇的最佳生长水深，芦苇处于生育旺盛期，芦苇平均密度和平均盖度出现明显的峰值，随水深变化芦苇平均密度和平均盖度向峰值两侧递减，而芦苇平均株高和平均茎粗随水深增加呈递增趋势；芦苇植株的高度随着水深的增加而增加，是由于芦苇作为大型的挺水植物，需要从水中挺出水面，获得CO_2和光照以进行光合作用，并且将O_2输送到根系进行呼吸和根围的氧化；在水深为55 cm时普通芦苇的杆茎最高；当淹水高度超过80 cm时，芦苇的生物量开始减少；芦苇对水的适应性深度为45±20 cm，但是最深不能超过70 cm[27,37]。

本研究核算了满足动态水深需要的水量，但是实际上小湖区的芦苇生长未按动态水深配水，一般是进行一次冬灌或春灌，然后是生长期有水就灌溉，没水就任其生长，烤田也不在生长期内而是在生长期之后泄水进行。就耗水情况来说，实际方式比较省水，但并未满足芦苇生态需水要求。基于本文研究结果，又结合实际，可考虑不进行生长期的烤田，降低耗水，可节省水量0.87×10^8 m^3。

4 结 论

本文以小湖区芦苇湿地为研究目标，考虑芦苇自身生长耗水、水面耗水、地下水渗漏以及芦苇生长季需要的年内动态水位情况进行小湖区生态需水核算较为合理。月尺度结果有利于年内水资源调控。

（1）小湖区年最小、中等、理想生态需水量分别为3.02×10^8 m^3、4.07×10^8 m^3、5.10×10^8 m^3。

（2）小湖区生长期3—9月最小生态需水量分别为0.22×10^8 m^3、0.35×10^8 m^3、0.44×10^8 m^3、0.51×10^8 m^3、0.39×10^8 m^3、0.41×10^8 m^3、0.28×10^8 m^3；理想生态需水量分别为0.37×10^8 m^3、0.59×10^8 m^3、0.75×10^8 m^3、0.86×10^8 m^3、0.68×10^8 m^3、0.69×10^8 m^3、0.48×10^8 m^3。

（3）如若满足其生态目标植物芦苇的生长季动态水位需求，年生态需水量需增加2.98×10^8 m^3，小湖区生长期3—9月最小生态需水量分别为0.40×10^8 m^3、0.52×10^8 m^3、0.79×10^8 m^3、0.86×10^8 m^3、2.31×10^8 m^3、0.41×10^8 m^3、0.28×10^8 m^3；理想生态需水量分别为0.54×10^8 m^3、0.76×10^8 m^3、1.10×10^8 m^3、1.21×10^8 m^3、2.60×10^8 m^3、0.69×10^8 m^3、0.48×10^8 m^3。

参考文献（References）

[1] 唐蕴, 王浩, 严登华. 向海自然保护区湿地生态需水研究[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 101-106. [Tang Yun, Wang Hao, Yan Denghua. Wetland ecological water demand in Xianghai Natural Reserve[J]. Resources Science, 2005, 27(5): 101-106.]

[2] 张海燕, 刘彬. 近50年博斯腾湖小湖区芦苇资源量消长变化及主要驱动因素[J]. 广东农业科学, 2015, 42(9): 154-159. [Zhang Haiyan, Liu Bin. Resources changes of *Pragmites australis* and its impact factors in small lake of Bosten Lake in recent 50 years[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(9): 154-159.]

[3] 罗金明, 王永洁, 刘复刚, 等. 扎龙盐沼湿地对乌裕尔流域径流变化的水文响应[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 838-844. [Luo Jinming, Wang Yongjie, Liu Fugang, et al. Hydrological response of the Zhalong saline marsh to the change of the runoffs in the Wuyur catchment, northeastern China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 838-844.]

[4] 温四民, 张桂玲, 类淑桐, 等. 临沂湿地生物多样性研究及特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 653-658. [Wen Simin, Zhang Guiling, Lei Shutong, et al. Research and characteristics analysis of wetland biodiversity in Linyi City[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(4): 653-658.]

[5] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 626-633. [Zheng Hongxing, Liu Changming, Feng Huali. On concepts of ecological water demand[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 626-633.]

[6] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(11): 1072-1082. [Yang Zhifeng, Cui Baoshan, Liu Jingling. Eco-environmental water demand assessment methods and examples[J]. Science in China Series D Earth Sciences, 2004, 34(11): 1072-1082.]

[7] 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述[J]. 生态学

报, 2005, 25(4): 892−903. [Wang Genxu, Liu Guimin, Chang Juan. Review on some issues of ecohydrology research at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 892−903.]

[8] 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 267−273. [Yan Denghua, Wang Hao, Wang Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 267−273.]

[9] 胡广录, 赵文智, 谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 193−200. [Hu Guanglu, Zhao Wenzhi, Xie Guoxun. Advances on theories of ecological water requirements of vegetation in arid area[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(2): 193−200.]

[10] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态需水量研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 219−224. [Cui Baoshan, Yang Zhifeng. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(2): 219−224.]

[11] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态需水量等级划分与实例分析[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 21−28. [Cui Baoshan, Yang Zhifeng. The classification and case study on eco-environmental water requirement of wetlands[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 21−28.]

[12] 冯夏清, 章光新. 湿地生态需水研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2228−2234. [Feng Xiaqing, Zhang Guangxin. Research advances in wetlands ecological water requirement[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(12): 2228−2234.]

[13] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604−609. [Liu Jingling, Yang Zhifeng. A study on the calculation methods of the minimum eco-environmental water demand for lakes[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(5): 604−609.]

[14] 汤洁, 佘孝云, 林年丰, 等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学, 2005, 25(3): 367−373. [Tang Jie, She Xiaoyun, Lin Nianfeng, et al. Advances in researches on the theories and methods of eco-environmental water demand[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(3): 367−373.]

[15] 李九一, 李丽娟, 姜德娟, 等. 沼泽湿地生态储水量及生态需水量计算方法探讨[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 289−296. [Li Jiuyi, Li Lijuan, Jiang Dejuan, et al. Calculation method on ecological pondage and ecological water requirement of marsh[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 289−296.]

[16] 周林飞, 许士国, 李青山, 等. 扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 845−851. [Zhou Linfei, Xu Shiguo, Li Qingshan, et al. Safety threshold of eco-environmental water requirement in wetland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 845−851.]

[17] 高凡, 黄强, 畅建霞. 我国生态需水研究现状、面临挑战与未来展望[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 755−760. [Gao Fan, Huang Qiang, Chang Jianxia. Progress and perspectives on ecological water requirement in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(6): 755−760.]

[18] 邓雯, 陈刚, 王肖鹏, 等. 滇池外海环湖湿地生态需水研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(1): 99−104. [Deng Wen, Chen Gang, Wang Xiaopeng, et al. Wetland ecological water damand in Lake Dianchi Waihai[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(1): 99−104.]

[19] 张琬抒, 周林飞, 成遣. 辽河河口湿地生态环境需水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 101−106, 128. [Zhang Wanshu, Zhou Linfei, Cheng Qian. Eco-environmental demand for water in wetlands at Liaohe Estuary[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(11): 101−106, 128.]

[20] 王富强, 张红璐, 赵衡, 等. 三门峡库区湿地水资利用效用评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 69−73, 101. [Wang Fuqiang, Zhang Honglu, Zhao Heng, et al. Evaluation of water resources utilization utility in Sanmenxia Reservoir Wetland[J]. Yellow River, 2021, 43(3): 69−73, 101.]

[21] 王明净, 杜展鹏, 段仲昭, 等. 河湖生态系统生态用水优化研究——以滇池流域为例[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1341−1348. [Wang Mingjing, Du Zhanpeng, Duan Zhongzhao, et al. Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: A case study of Lake Dianchi Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1341−1348.]

[22] 万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖湿地生态脆弱性评价研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 248−254. [Wan Hongxiu, Sun Zhandong, Wang Run. Study on the evaluation of ecological frangibility of the wetlands in the Bosten Lake region[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(2): 248−254.]

[23] 李继冰. 博斯腾湖的水量蒸发蒸腾损耗[C]//新疆维吾尔自治区水利学会. 新疆水利学会第七次代表大会获奖论文集. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区水利学会, 2001: 14. [Li Jibing. The water evaporation loss of Bosten Lake[C]//Xinjiang Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the Award-winning Papers of the 7th Congress of Xinjiang Hydraulic Engineering Society. Urumqi: Xinjiang Hydraulic Engineering Society, 2001: 14.]

[24] 买尔哈巴·买买提汗, 玉素甫江·如素力, 安尼瓦尔·阿布都热依木, 等. 近26 a博斯腾湖芦苇湿地的动态监测及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 797−804. [Maimaitihan Maierhaba, Rusuli Yusufujiang, Abudureyimu Anniwaer, et al. Dynamic variation of *Phragmites australis* wetland in the Bosten Lake Basin and its driving factors in recent 26 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 797−804.]

[25] 张涛, 吴剑锋, 林锦, 等. 基于水量平衡的博斯腾湖水位变化分析[J]. 水文, 2015, 35(3): 78−83. [Zhang Tao, Wu Jianfeng, Lin Jin, et al. Analysis of water level change of Bosten Lake based on water balance[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(3): 78−83.]

[26] 李宇安, 谭芫, 姜逢清, 等. 20世纪下半叶开都河与博斯腾湖的水文特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 215−218. [Li Yu'an, Tan Yan, Jiang Fengqing, et al. Study on hydrological features of the

Kaidu River and the Bosten Lake in the second half of 20th century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 215-218.]
[27] 刘月杰. 博斯腾湖芦苇湿地生态恢复研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004. [Liu Yuejie. Study on ecological restoration of reed wetland in Bosten Lake[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004.]
[28] 钟瑞森, 董新光. 新疆博斯腾湖水盐平衡及水环境预测[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 58-64. [Zhong Ruisen, Dong Xinguang. Water-salt balance and water environment forecast of Lake Bosten in Xinjiang[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1): 58-64.]
[29] 王影, 李新国, 李会志, 等. 博斯腾湖小湖区湿地变化及其保护对策研究[J]. 海洋湖沼通报, 2010(2): 123-129. [Wang Ying, Li Xinguo, Li Huizhi, et al. Study on the changes of the small lake wetland in Bosten Lake and its protective countermeasures[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(2): 123-129.]
[30] 阿依苏力坦·麦麦提艾力, 迪丽努尔·阿吉. 博斯腾湖最低生态需水量研究[J]. 长春教育学院学报, 2013, 29(20): 57, 59. [Memetiyali Aysuysulitan, Aji Dilinur. Study on the minimum ecological water requirement of Bosten Lake[J]. Journal of Changchun Education Institute, 2013, 29(20): 57, 59.]
[31] 穆尼热·赛买提. 博斯腾湖芦苇覆盖率影响因素研究及预测[J]. 地下水, 2018, 40(1): 180-181, 200. [Semati Munier. Research and prediction on influencing factors of reed coverage in Bosten Lake[J]. Ground Water, 2018, 40(1): 180-181, 200.]
[32] 张皓, 李新国, 闫凯, 等. 博斯腾湖小湖区湿地景观变化特征研究[J]. 西北植物学报, 2016, 36(12): 2533-2540. [Zhang Hao, Li Xinguo, Yan Kai, et al. Wetland landscape change in small lakes of Bosten Lake[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(12): 2533-2540.]
[33] 李波, 迪丽努尔·阿吉. 博斯腾湖湿地沉积物颗粒组成对渗透系数的影响[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 179-185. [Li Bo, Aji Dilinuer. Effect of sediment particle composition on vertical hydraulic conductivity of Bosten Lake Wetland[J]. Ecological Science, 2017, 36(2): 179-185.]
[34] 阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木, 等. 博斯腾湖面积变化遥感监测及其驱动因素分析[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(4): 766-774. [Mamat Aynur, Halik Ümüt, Keram Ayjamal, et al. Remote sensing monitoring of Bosten Lake water resources and its driving factor analysis[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(4): 766-774.]
[35] 张皓. 基于RS/GIS的博斯腾湖西岸湖滨湿地景观演变研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2017. [Zhang Hao. Research on the landscape evolution of lakeside wetland on the west bank of Bosten Lake based on RS/GIS[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2017.]
[36] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 606-614. [Cui Baoshan, Li Yinghua, Yang Zhifeng. Management-oriented ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 606-614.]
[37] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 等. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1533-1541. [Cui Baoshan, Zhao Xinsheng, Yang Zhifeng, et al. The response of reed community to the environment gradient of water depth in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1533-1541.]
[38] 万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 260-266. [Wan Hongxiu, Sun Zhandong, Wang Run. Influence of water level change of Bosten Lake on wetland eco-environment[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(2): 260-266.]
[39] 刘春彤, 曹升乐, 刘阳, 等. 不同生态目标玉符河湿地生态需水量[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 295-299. [Liu Chuntong, Cao Shengle, Liu Yang, et al. The wetland ecological water requirement of Yufuhe River based on different ecological objectives [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 295-299.]

Threshold of ecological water demands for the small lake wetland of Bosten Lake

LIU Ying[1,2,3], ZHONG Ruisen[1,2,3], DUAN Yongchao[1,2,3,4],
CHENG Yong[5], JIANG Lixin[6], LI Jianghong[6], LIU Tie[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of GIS & RS Application Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Binjiang College, Nanjing University of Information Science & Technology, Wuxi 214105, Jiangsu, China; 5. Xinjiang Tarim River Basin Bayinguoleng Authority, Korla 841000, Xinjiang, China; 6. Bosten Lake Management Office, Xinjiang Tarim River Basin Bayinguoleng Authority, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: The thresholds of wetland ecological water demand are critical factors in determining whether an ecosystem will deteriorate or not. Once a threshold is exceeded, several material balance relations and functions and the health of the system will be affected. Monthly-scale thresholds are helpful for the optimal allocation of water resources. Because of the special landscape structure of small lake wetland of Bosten Lake, Xinjiang, China, where reed marshes are interlaced with waterways and open waters, we performed a frequency analysis using long-term time series data on open water surface area, using remote sensing data to determine the minimum, medium, and ideal open water areas of the small lake wetland. Then, the ecological water consumption of the small lake wetland was calculated using the evaporation pan value and several conversion factors. Finally, the minimum, medium, and ideal monthly ecological water consumption of the small lake wetland was estimated. Overall, the results revealed that the annual average monthly minimum, medium, and ideal ecological open water surface areas of small lake wetland are 14.47 km^2, 21.56 km^2, and 26.75 km^2, respectively, whereas the monthly minimum ecological water demands for small lake wetland during the growing season from March to September are 0.22×10^8 m^3, 0.35×10^8 m^3, 0.44×10^8 m^3, 0.51×10^8 m^3, 0.39×10^8 m^3, 0.41×10^8 m^3, and 0.28×10^8 m^3, respectively, with June being the largest and March the smallest. Additionally, the annual minimum ecological water demand of the small lake wetland is approximately 3.02×10^8 m^3. If the dynamic water level required by the ecological target for the growth of reeds in the small lake wetland is also met, the minimum monthly water demands for small lake wetland during the growing season from March to September will be 0.40×10^8 m^3, 0.52×10^8 m^3, 0.79×10^8 m^3, 0.86×10^8 m^3, 2.31×10^8 m^3, 0.41×10^8 m^3, and 0.28×10^8 m^3, respectively, with that in July being the largest and that in September the smallest, whereas the annual minimum ecological water demand of small lake wetland is approximately 5.99×10^8 m^3. The values calculated in this study can be used for the annual and monthly scales of water inflow allocation and effluent water regulation in small lake wetlands, helping to improve the efficiency of regional water resource use and ensure sustainable ecological development of small lake wetlands.

Key words: ecological water demand; threshold; frequency analysis; small lake wetland of Bosten Lake